

フラッシュ X 線を用いた粉体流中の ダストアグリゲイト成長過程の観測

○長足友哉¹, 中村昭子¹, 長谷川直², 和田浩二³

¹神戸大学大学院理学研究科,²宇宙航空研究開発機構³千葉工業大学惑星探査研究センター

目的：

本研究は原始惑星系円盤のサブミクロンサイズのダストがキロメートルサイズの微惑星へと成長する過程に着目している。付着性の高い水氷ダストは衝突付着により微惑星形成が可能とされる一方、付着性の低い岩石ダストの場合は跳ね返りが起こり、ミリメートルからセンチメートルサイズに成長が制限されることが室内実験により示されている。そこで最近では、これらの集積による重力不安定での微惑星形成が提案されている。しかし、ダストアグリゲイトの跳ね返りは、数値シミュレーションで原始惑星系円盤環境では起こらず、ダストアグリゲイトの配位数が 6 を越える場合にのみ起こるとされる[1]。一方、跳ね返りが観測されたサブミリメートルサイズを扱う室内実験の手法としては主に二つがあり、容器にダストアグリゲイトを複数入れて落下中の微小重力下でそれらの相互衝突させるもの[2]と、ヒーターによる加熱でガスの流れを作り、ダストアグリゲイトを浮かせた状態で相互衝突させるもの[3]である。しかし、前者ではダストアグリゲイトと容器の衝突が起こるといった難点があり、後者では大きなサイズのアグリゲイトの扱いが難しい。そこで、これらの難点を回避できる手法として、自由落下粉体流に形成するクラスターを衝突させる手法を考えた。大気圧下および減圧下で自由落下する球形粒子の流れにクラスターが形成し、クラスター化には粒子の付着力が寄与することが知られている[4,5,6]。しかし、ダストアグリゲイトの衝突成長研究に自由落下粉体流クラスターを用いる上で次のような課題がある。まず、この自由落下粉体流クラスターの配位数の情報は室内実験で得られていないこと、また、原始惑星系円盤に存在すると考えられる不規則形状の粒子を用いたクラスター形成研究は行われていないことが挙げられる。そこで、本研究は、今後行う粉体流クラスターの衝突実験のため、これまでに行われていないフラッシュ X 線撮像により、自由落下粉体流に形成するクラスターの密度から配位数の情報、自由落下粉体流の密度の変化についての情報を得ることを目的とする。

実験手法：

真空チャンバー内で漏斗から粒子（45 μm と 53 μm の球形ガラスビーズと不規則形状の 45 μm ガラスパウダーと 70 μm の石英砂：図 1）を流して粉体流を作り、それを図 2 のように五つの高さでフラッシュ X 線撮像を行い、それぞれで粉体流の密度を推定し、粉体流の

密度の時間変化とクラスターの密度を推定する。実験は全て 0.1 気圧で行った。

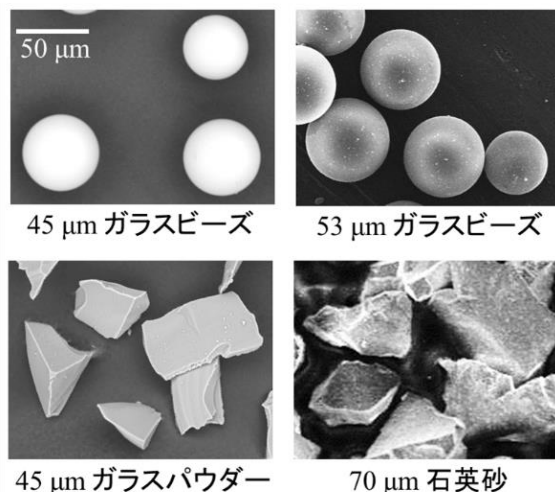


図 1 : 用いた粒子

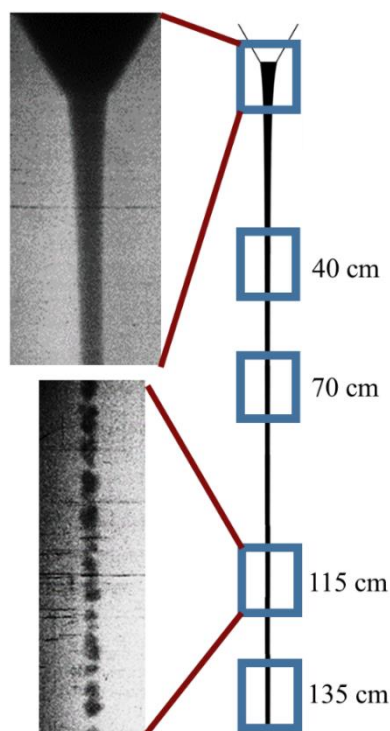


図 2 : 実験概略図

実験結果 :

まずクラスターのフラッシュ X 線観測による密度推定について述べる。元の X 線強度を I_0 、クラスターによる吸収後の X 線強度を I とすると、以下の式が書ける。

$$I/I_0 = e^{-\kappa\rho_0\varphi L}$$

ここで、 L, φ はクラスターの奥行きと充填率、 ρ_0 は粒子密度である。 κ は粒子組成に依る定数で較正実験により決定する。

クラスターの奥行きと幅が等しいと仮定すると、元の X 線強度、クラスターによる吸収後の X 線強度、クラスターの幅から平均充填率を推定できる。図 3 にその結果を示す。横軸はクラスターの幅、縦軸はクラスターの充填率で、赤とオレンジが 45 μm と 53 μm のガラスビーズ、青と水色は不規則形状の 45 μm のガラスパウダーと 70 μm の石英砂の結果。球形ガラスビーズの充填率は 0.3~0.4 程度、不規則形状粒子は 0.15~0.3 程度であることが分かる。

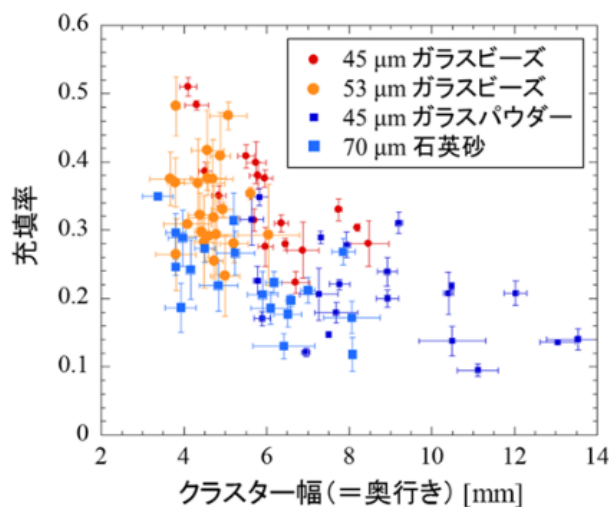


図 3 : クラスターの充填率

ここで、これらのクラスターの充填率の結果からクラスターの配位数について考える。図4はダストアグリゲイト衝突成長研究の数値シミュレーション[1,7]で用いられたダストアグリゲイトの配位数と充填率の関係で、横軸が充填率、縦軸が配位数を示す。始めに述べたように、これらのダストアグリゲイト間衝突の数値シミュレーションでは、ダストアグリゲイトの配位数が6を上回る場合にのみ、はね返りが生じることが示されている[1]。

ここに、先程推定した球形ガラスビーズクラスターの充填率 0.3~0.4 程度から、平均配位数は 3~6 程度と推定される(赤く塗られた領域)。また、不規則形状粒子の場合は、充填率が 0.15~0.3 程度で、球形粒子の数値シミュレーションの値が適用可能と考えるならば、配位数は 2~5 程度となる(青く塗られた領域)。つまり、この配位数 2~6 はダストアグリゲイト間衝突で、はね返りが起こらない程度であることから、粉体流クラスターを衝突させた場合、はね返ることなく衝突付着成長する可能性がある。

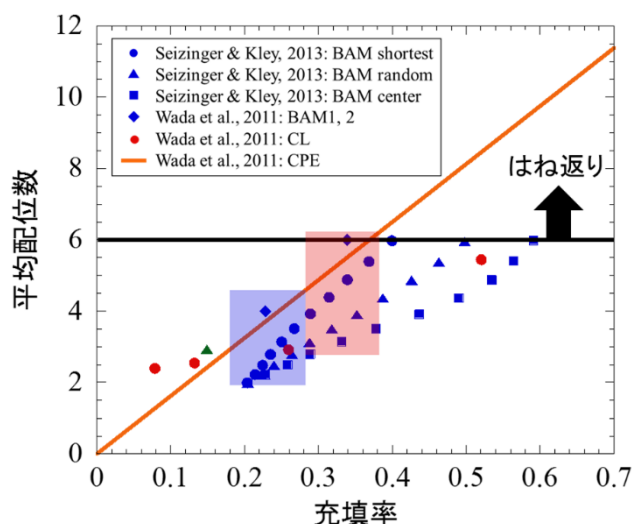


図4:ダストアグリゲイトの配位数

次に粉体流の時間変化の観測結果を図5に示す。左が球形の 45 μm ガラスビーズ、右が不規則形状の 45 μm ガラスパウダーの結果で、それぞれ左から順に流出口から 0 cm、40 cm、70 cm、115 cm、135 cm の高さでのフラッシュ X 線透過画像。ガラスビーズは 40 cm でくびれ始め、1 m 程度落下するとクラスターが形成し始める一方、ガラスパウダーは変化が早く、流出直後にくびれ始め、40 cm 落下するころには既にクラスターを形成していることがわかる。

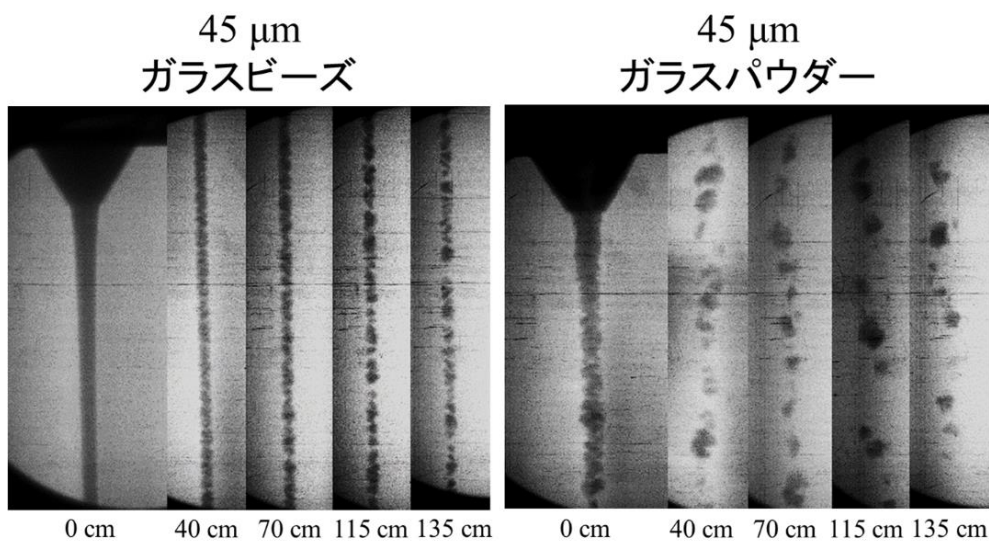


図5:粉体流の時間変化

最後に、密度の時間変化の観測結果を図6に示す。横軸は密度、縦軸は落下距離で、赤が45 μm の球形ガラスビーズ、青が45 μm の不規則形状ガラスパウダーの結果。赤と青で塗られた領域はそれぞれ、上記のフラッシュ X 線透過画像から予想されるガラスビーズおよびガラスパウダーのクラスター形成高さを示す。ガラスビーズもガラスパウダーもクラスター形成時には密度変化は終了していることがわかる。

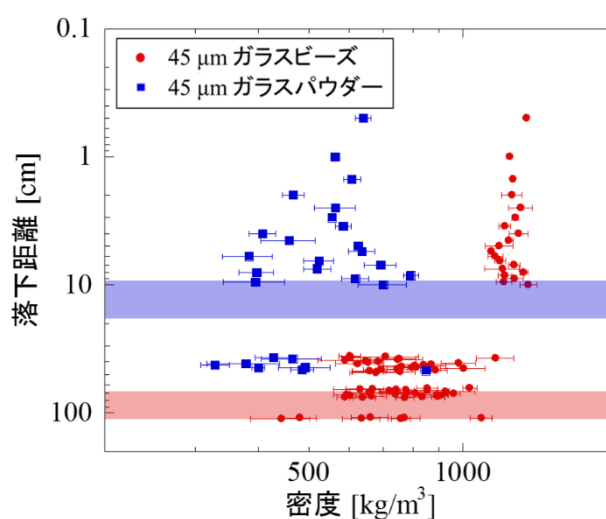


図6：粉体流の密度変化

今後の展望：

以上の実験結果を踏まえ、今後の展望として、二つの漏斗を内側に傾けることで水平方向の相対速度を与え、クラスター同士の衝突を引き起こし、それを可視光とX線で三次元的に観測を行う。それにより、原始惑星系円盤内のミリメートルからセンチメートルサイズのダストアグリゲイトの成長過程の理解につなげることを今後の目標とする。

まとめ：

粉体流に形成するクラスターの配位数は6以下と推定され、クラスター間衝突で跳ね返らないと予想される。クラスター形成時には既に密度の変化は終了していることがわかった。今後、自由落下粉体流に形成するダストクラスター同士の衝突実験を行う。

参考文献

- [1] Wada et al. (2011) *The Astrophysical Journal*, 737, 36.
- [2] Brisset et al. (2016) *Astronomy & Astrophysics*, 593, A3.
- [3] Kelling et al. (2014) *The Astrophysical Journal*, 783, 111.
- [4] Royer et al. (2009) *Nature*, 459:1110-1113.
- [5] Waitukaitis et al. (2011) *Physical Review E*, 83, 051302.
- [6] Nagaashi et al. (2018) *Progress in Earth and Planetary Science*, 5, 52.
- [7] Seizinger and Kley (2013) *Astronomy & Astrophysics*, 551, A65.